

กรณีศึกษาของอุณหพลศาสตร์และพฤติกรรมการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเกรด 6061-T6

A Case Study of Thermodynamics and Electrochemical Corrosion Behavior of Al 6061-T6

กนกอร รจนากิจ¹ ไชยรัช เมฆแก้ว² ชาตินักรบ แสงสว่าง³
ศิวกร สุขประเสริฐชัย³ และ อีร์ เซาวนนทปัญญา^{3*}
Kanok-on Rodjanakid¹, Chairat Mekkaew²,
Chatnugrob Sangsawang³, Siwakorn Sukprasertthchai³
and Thee Chowwannonthapunya^{3*}

Received: 15 January 2024

Revised: 11 July 2024

Accepted: 15 July 2024

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061-T6 ได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มขึ้นแต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการบ่มแข็งทางอุณหภูมิอาจทำให้เกิดอนุภาค Mg_2Si การกระจายและขนาดที่สม่ำเสมอของอนุภาคเหล่านี้ส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการมีอนุภาคเหล่านี้ อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนของกัลวานิกในเฉพาะบริเวณระหว่างอนุภาคและเมทริกซ์อะลูมิเนียม ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงให้ความสนใจอย่างมากในเรื่องของพฤติกรรมการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมอะลูมิเนียมนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมพาณิชยนาวี กรณีศึกษานี้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการกัดกร่อนทางอุณหพลศาสตร์ของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จากนั้นจึงเสนอการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของอะลูมิเนียมในสารละลายทางทะเลจำลองโดยใช้เทคนิคเส้นโค้งโพลาริเซชันและอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS)

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10170

¹ Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthorbnuri University, Bangkok, Thailand 10170

² วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ปทุมธานี ประเทศไทย 12000

² College of Engineering, Rangsit University, Pathum Thani, Thailand 12000

³ คณะพาณิชยนาวีนานาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี ประเทศไทย 20230

³ Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Chonburi, Thailand 20230

*ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: thee.c@ku.th

การศึกษาแสดงให้เห็นว่าชั้นฟิล์มแพสซีฟส่วนใหญ่ประกอบด้วย $\text{Al}(\text{OH})_3$ สามารถเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวของอะลูมิเนียมในช่วง pH 5.7-8.5 ซึ่งทำให้อะลูมิเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โดยผลเส้นโค้งโพลาไรเซชันแสดงให้เห็นว่าคลอไรด์ไอออนสามารถทำลายชั้นฟิล์มแพสซีฟและส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่แบบรูเข็ม ผลลัพธ์ของ EIS แสดงให้เห็นว่าการทำลายฟิล์มแบบแพสซีฟสามารถนำไปสู่การเพิ่มอัตราการกัดกร่อนของอะลูมิเนียม 6061-T6 อย่างมีนัยสำคัญ การคำนวณบนพื้นฐานค่าพลังงานอิสระชี้ให้เห็นว่าการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ของอะลูมิเนียม 6061-T6 สามารถเริ่มต้นได้จากความต่างศักย์เคมีไฟฟ้าระหว่างอนุภาค Mg_2Si และเมทริกซ์อะลูมิเนียมส่งผลให้แมกนีเซียมถูกกัดกร่อนและเป็นจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนเฉพาะที่แบบรูเข็ม

คำสำคัญ: อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061-T6 การบ่มแข็ง การกัดกร่อนแบบเฉพาะที่

ABSTRACT

Aluminum alloy 6061-T6 is now gaining interest from industries. It is known that T6 heat treatment process induced the presence of Mg_2Si particles. The uniform distribution and size of these particles are responsible for the improved mechanical properties. However, the presence of these particles may also produce the local galvanic corrosion between the particles and aluminum matrix. Thus, the electrochemical corrosion behavior of this aluminum alloy is of great interest for industries, particularly marine industries. This case study provides insight in the thermodynamics corrosion of pure aluminum and then offers the preliminary study on the electrochemical corrosion of aluminum in the artificial marine solution using a polarization curve technic and an electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The study shows that the passive film mainly composed of $\text{Al}(\text{OH})_3$ can be formed on the substrate of aluminum, enhancing the corrosion resistance in a pH range of 5.7-8.5. Polarization curve results show that the presence of chloride ions attacks the passive film, promoting the pitting corrosion. EIS results display that the destruction of passive film can lead to a significantly increased corrosion rate of aluminum 6061-T6. The calculation based on Gibbs free energy pointed out that the localized corrosion of aluminum 6061-T6 can be initiated from the electrochemical potential difference between Mg_2Si particles and aluminum matrix. Mg can be dissolved, leading to the onset of the localized corrosion.

Keywords: Aluminum Alloy 6061-T6; Thermal Aging Process; Localized Corrosion

บทนำ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมจากอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา ค่าการนำไฟฟ้า ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี [1] สำหรับโลหะอะลูมิเนียมประเภทใช้แรงขึ้นรูป เช่น เกรด 6061 นั้นมีการเติมธาตุ แมกนีเซียมและซิลิกอน ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้

โดยวิธีการอบชุบแบบบ่มแข็ง (T6) [2] ดังนั้นโลหะอะลูมิเนียมเกรดดังกล่าวนี้จึงเป็นหนึ่งในวัสดุวิศวกรรมที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมชายฝั่ง เช่น เรือความเร็วสูงและโครงสร้างนอกชายฝั่ง [3] แต่อย่างไรก็ตาม บรรยากาศการใช้งานทางชายฝั่งดังกล่าวนี้เป็นบรรยากาศที่เจือปนด้วยคลอไรด์ ซึ่งมีการกัดกร่อนที่รุนแรงเมื่อเทียบกับบรรยากาศอื่นๆ [4] ดังนั้นการกัดกร่อนของโลหะในบรรยากาศชายฝั่งจึงเป็นปัญหาที่สำคัญ ซึ่งกระทบต่อการใช้งานและความปลอดภัยของโครงสร้างที่ทำจากโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6

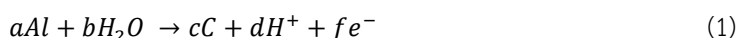
เป็นที่ทราบกันดีว่า โลหะอะลูมิเนียมมีความต้านทานกัดกร่อนที่ดี โดยผิวหน้าของอะลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับอากาศแล้วเกิดชั้นออกไซด์ฟิล์มที่เคลือบผิวหน้าของอะลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ตาม ในบรรยากาศที่มีการเจือปนของไอออนที่มีความสามารถทำลายฟิล์มดังกล่าว เช่น บรรยากาศชายฝั่งนั้น โลหะอะลูมิเนียมจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนได้หลายรูปแบบ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม หรือการกัดกร่อนตามขอบเกรน [5] สำหรับโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 นั้นเป็นโลหะน้ำหนักเบาที่มีความแข็งแรงที่ได้มาจากการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวในโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอ [6] ดังนั้นโลหะประเภทนี้จึงมีโอกาสดังกล่าวที่เกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ในแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม [7, 8] โดยพบว่าการตรวจสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มนั้นทำได้ยากเนื่องจากขนาดของรูเข็มการกัดกร่อนนั้นมีขนาดเล็ก [9] ซึ่งอัตราการขยายตัวของรูเข็มการกัดกร่อนแบบหลุมนั้นเร็วกว่าการสูญเสียเนื้อโลหะในการกัดกร่อนแบบทั่วถึงและผลของความเสียหายนั้นส่งผลกระทบต่อการใช้งานและความปลอดภัยของโครงสร้างที่ทำจากโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ดังนั้นความเข้าใจในพฤติกรรมกัดกร่อนของอะลูมิเนียมและพฤติกรรมกัดกร่อนเชิงเคมีไฟฟ้าของโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 จึงมีความสำคัญต่อการใช้งานวัสดุดังกล่าวในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในบรรยากาศชายฝั่ง

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ให้เข้าใจในพฤติกรรมกัดกร่อนทั่วไปของอะลูมิเนียมและทำการศึกษากฎการกัดกร่อนเชิงเคมีไฟฟ้าของโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ในสารละลายจำลองสภาวะบรรยากาศชายฝั่งโดยวิธีการเคมีไฟฟ้าแบบเส้นโค้งโพลาริเซชันและการทดสอบอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สมการทางอุณหพลศาสตร์ของการกัดกร่อน

สมการเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมกับน้ำแสดงในสมการที่ 1 [10]



โดย

Al หมายถึง อะลูมิเนียม โดยการศึกษาใช้ในการพิจารณาของแข็ง (Al) อีออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) หรือสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เช่น $Al(OH)_3$

C หมายถึง อีออน Al^{3+} หรือ AlO_2^- รวมทั้งอะลูมินา ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าและเคมี

a และ b หมายถึง จำนวนโมลของสารตั้งต้น c และ d คือ จำนวนโมลของสารภายหลังจากการทำปฏิกิริยา

f หมายถึง จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาในสมการที่ 1 ดำเนินไปด้วยไปค่าคงที่สมดุล (K)

$$K = \left(\frac{a_C^c a_{H^+}^d}{a_{Al}^a a_{H_2O}^b} \right) \quad (2)$$

โดย

a คือ ค่าแอกทิวิตีของสารในระบบ โดยสารในสถานะของแข็งและน้ำในสถานะของเหลวค่า a มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับไอออนนั้นมีค่า a เท่ากับความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (ΔG) กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่สภาวะมาตรฐาน (ΔG^0) และค่าคงที่สมดุล (K) แสดงในสมการที่ 3 [10, 11]

$$\Delta G = \Delta G^0 + \left[RT \ln \left(\frac{a_C^c a_{H^+}^d}{a_{Al}^a a_{H_2O}^b} \right) \right] \quad (3)$$

ความสัมพันธ์ pH กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนแสดงในสมการที่ 4 และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกับค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน E^0 และค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงในสมการที่ 5 และ 6 [11, 12]

$$pH = -\log a_{H^+} \quad (4)$$

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (5)$$

$$\Delta G = -nFE \quad (6)$$

เมื่อนำสมการที่ 4, 5 และ 6 มาแทนในสมการที่ 3 ได้สมการที่ 7 ซึ่งใช้หาค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ที่ 25 °C ที่ 1 บรรยากาศ

$$E = E^0 + \left(\frac{0.059}{n} \right) \log \left(\frac{a_C^c}{a_{Al}^a} \right) + \frac{[-0.059d]}{n} pH \quad (7)$$

2. ข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ของสารที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของอะลูมิเนียม

Table 1 Gibbs free energy of species formed in Al-H₂O system at 25 °C [13]

Formula	State	ΔG° (J/mol)
Al	solid	0
Al(OH) ₃	solid	-1,147,550
H ₂ O	liquid	-237,077
Al ³⁺	ion	-480,930
AlO ₂ ⁻	ion	-838,967
H ²⁺	ion	0

การกัดกร่อนของอะลูมิเนียมในน้ำที่มีอุณหภูมิ 25 °C ก่อให้เกิด Al³⁺ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิด Al(OH)₃ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็น AlO₂⁻ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตารางที่ 1 แสดงข้อมูลพลังงานอิสระของสารที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมในน้ำที่มีอุณหภูมิ 25 °C

3. การทดสอบพฤติกรรมเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของอะลูมิเนียม

ในการทดสอบพฤติกรรมเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ในบรรยากาศชายฝั่ง ทำโดยการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตทหรือกัลวานอสแตท (Parstat 2273) เพื่อประเมินพฤติกรรมเคมีไฟฟ้าจากเส้นโค้งโพลาริเซชันโดยใช้ระบบสามอิเล็กโทรด โดยใช้งานอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ในรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1 ตารางเซนติเมตรเป็นอิเล็กโทรดทำงานและขั้วแพลทินัมเป็นอิเล็กโทรดร่วม โดยอิเล็กโทรดชนิดคาโลเมอลัมต์เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง (Saturated Calomel Electrode : SCE) และทำการทดสอบอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซิงเคมีไฟฟ้าด้วยช่วงความถี่ 10⁻³ - 10⁵ เฮิร์ต ที่มีค่าแอมพลิจูด 10 มิลลิโวลต์

ผลการทดลอง

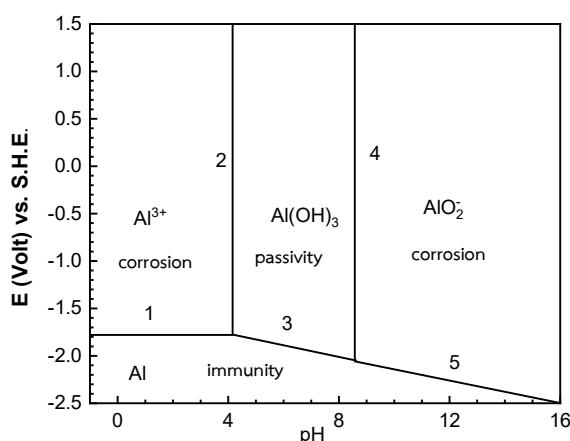
1. ปฏิกิริยาการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมกับน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C

เมื่ออะลูมิเนียมสัมผัสกับน้ำ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ [12, 13]



Table 2 Reaction number, equations and line number used to plot Potential-pH diagram of Aluminum corroding in water at 25 °C

Reaction	Equation	Line in Fig. 1
8	$E = 0.02\log[Al^{3+}] - 1.63$	1
9	$pH = -0.33\log[Al^{3+}] + 2.81$	2
10	$E = -0.0591pH - 1.51$	3
11	$pH = \log[AlO_2^-] + 14.6$	4
12	$E = -0.08pH - 1.4$	5

**Figure 1** Potential-pH diagram of Aluminum corroding in water at 25 °C.

โดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในสมการที่ 8, 10 และ 12 มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจนเท่ากับ -1.663, -1.55 และ -1.23 โวลต์ [11, 12] ตามลำดับ เมื่อนำค่าจากตารางที่ 1 และค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานแทนในสมการที่ 2 และ 7 ได้สมการที่ใช้สร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและ pH ตามตารางที่ 2 และได้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและ pH ของการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมกับน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C ในรูปที่ 1

จากความสัมพันธ์ศักย์ไฟฟ้าและ pH ของอะลูมิเนียมในรูปที่ 1 แสดงให้ทราบว่า ฟิล์มชั้นบางของ $Al(OH)_3$ จะฟอร์มตัวบนผิวหน้าของโลหะอะลูมิเนียมในช่วง pH 5.7-8.5 โดยช่วง pH ที่ต่ำกว่า 5 โลหะอะลูมิเนียมจะถูกกัดกร่อนแล้วเกิด Al^{3+} ส่วนในช่วงที่ pH ที่มากกว่า 8.5 โลหะอะลูมิเนียมจะถูกกัดกร่อนแล้วเกิด AlO_2^- แต่อย่างไรก็ตามโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์นั้นไม่สามารถใช้งานในงานวิศวกรรมได้ เนื่องจากความแข็งแรงไม่เพียงพอ [11, 12] โลหะอะลูมิเนียมผสม เช่น โลหะอะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูปเกรด 6061 นั้นเจือธาตุแมกนีเซียมและซิลิกอน ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเป็นสารละลายของแข็ง [1] นอกจากนี้ โลหะดังกล่าวยังสามารถอบชุบแบบบ่มแข็งซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการ

เจือธาตุผสมนั้นส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบรรยากาศชายฝั่งนั้น มีอนุภาคคลอไรด์ซึ่งสามารถทำลายฟิล์มชั้นบางของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่

2. พฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ในสารละลายจำลองบรรยากาศชายฝั่ง

รูปที่ 2 แสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันของการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นโค้งแอโนดและแคโทด โดยมีศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนประมาณ -0.67 โวลต์ (คาโลเมลล์เป็นตัวเป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง) เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นพบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสกัดกร่อนลดลง ซึ่งแสดงถึงการฟอร์มตัวของฟิล์มชั้นบางของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นฟิล์มแพสซีฟในเส้นโค้งแคโทด เมื่อศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นฟิล์มแพสซีฟเกิดความเสียหายและเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ณ ศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (E_{pit})

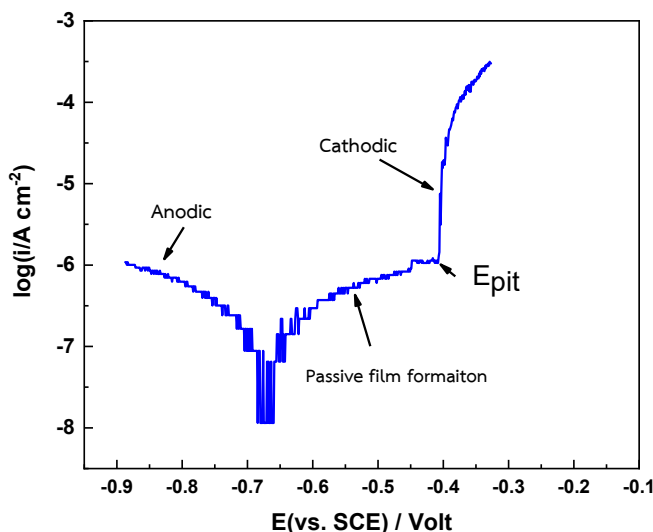


Figure 2 Polarization of Al6061-T6 corroding in a 0.1 mol NaCl solution.

รูปที่ 3 (a) แสดงผลของค่าอิมพีแดนซ์ของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 โดยพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของอะลูมิเนียมมีค่าสูงจากนั้นลดลงจนมีค่าเกือบคงที่ เมื่อให้ความถี่ในการทดลองเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความต้านทานที่สูงในช่วงความถี่ 10^{-2} เฮิร์ตซ์ นั้นแสดงถึงการฟอร์มตัวของฟิล์มชั้นบางของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ จากนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่ลดลงแสดงถึงการเก็บประจุและค่าอิมพีแดนซ์ที่เกือบคงที่นั้นแสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของการต้านทาน [7, 8]

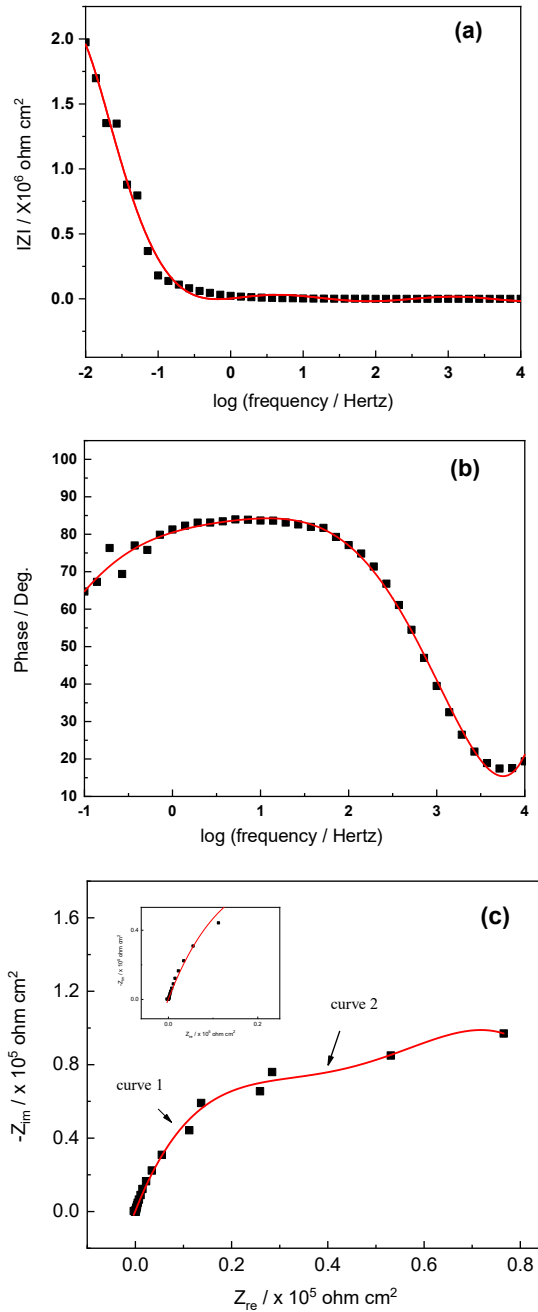


Figure 3 EIS results of Al 6061-T6 in a 0.1 mol NaCl solution
(a) Bode plot (b) Phase and (c) Nyquist plot

รูปที่ 3(b) แสดงค่าเฟสของอิมพีแดนซ์ และรูปที่ 3(c) แสดงแผนภาพไนควิสต์ ซึ่งแสดงถึงอิมพีแดนซ์ในส่วนจำนวนจริง (Z_{re}) และส่วนจินตภาพ (Z_{im}) ในขณะที่ทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละความถี่ โดยเมื่อพิจารณา

จากผลการทดลองพบว่าเส้นโค้งโนควิสต์นั้นประกอบไปด้วยเส้นโค้งการเก็บประจุสองเส้น โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงนั้นแสดงถึงค่าความต้านทานของสารละลาย (R_s) จากนั้นเป็นเส้นโค้งที่ 1 แสดงถึงค่าต้านทาน (R_f) และตัวเก็บประจุของฟิล์มชั้นบาง (C_{dl1}) และเส้นโค้งที่ 2 แสดงถึงค่าต้านทาน (R_{sub}) และตัวเก็บประจุของพื้นผิวของอะลูมิเนียม 6061-T6 (C_{dl2}) โดยเส้นโค้งที่ 2 นั้นมีรัศมีมากกว่าเส้นโค้งที่ 1 ซึ่งแสดงถึงอัตราการกัดกร่อนของพื้นผิวที่สูงขึ้นเมื่อฟิล์มชั้นบางนั้นถูกทำลาย โดยรูปที่ 4 แสดงถึงแบบจำลองทางไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษา

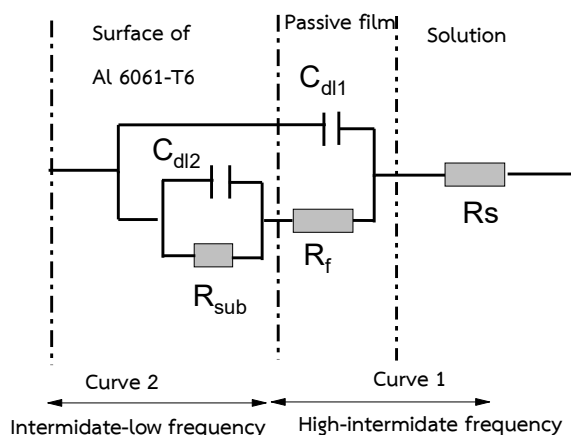


Figure 4 Equivalent circuit model for Al6061-T6 immersed in a 0.1 mol NaCl solution at room temperature

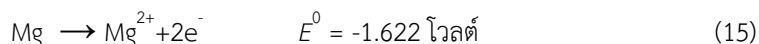
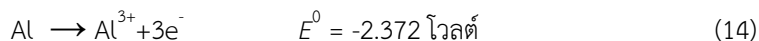
3. การกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ของอะลูมิเนียม 6061-T6

อะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูปเกรด 6061-T6 นั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยกระบวนการบ่มแข็ง ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาค Mg_2Si ที่มีขนาดเล็กในโครงสร้างพื้นอะลูมิเนียม จากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดครึ่งเซลล์รีดักชันพบว่า [10-14]

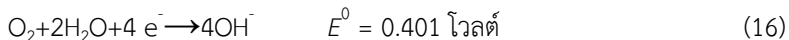
$$E^0 \text{ ของแมกนีเซียม (Mg) } = -2.372 \text{ โวลต์} > E^0 \text{ ของอะลูมิเนียม (Al) } = -1.662 \text{ โวลต์} \quad (13)$$

ดังนั้นแมกนีเซียมมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนมากกว่าอะลูมิเนียม เมื่อพิจารณาการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมใช้แรงขึ้นรูปเกรด 6061-T6 ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่ที่มี pH 6 ซึ่งเป็นกลาง พบว่าการกัดกร่อนจะเกิดจากแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ [13-14]

แอโนด



แคโทด



เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของทุกสารในสารละลายเท่ากับ 1 โมลาร์ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยสารละลายมี pH 6 ด้วยการแทนค่าในสมการ 7 ได้ ศักย์ไฟฟ้าของอะลูมิเนียม (E_{Al}), แมกนีเซียม (E_{Mg}) และ แคโทด (E_C) ดังนี้

$$E_{Al} = -2.372 - \left(\frac{0.059}{3}\right) \log(\text{Al}^{3+}) \quad (17)$$

$$E_{Mg} = -1.622 - \left(\frac{0.059}{3}\right) \log(\text{Mg}^{2+}) \quad (18)$$

$$E_C = 0.401 - \left(\frac{0.059}{4}\right) \log(\text{OH}^-)^4 \quad (19)$$

โดย pH = 6 หมายถึง $[\text{H}^+] = 10^{-6}$ และ $[\text{OH}^-] = 10^{-8}$ ดังนั้น $E_{Al} = -2.372$ โวลต์, $E_{Mg} = -1.622$ โวลต์ และ $E_C = 0.874$ โวลต์

ค่าศักย์ไฟฟ้าของอะลูมิเนียมกับแคโทด (E_1) = 3.24 โวลต์และค่าศักย์ไฟฟ้าของแมกนีเซียมกับแคโทด (E_1) = 2.56 โวลต์ และจากสมการที่ 6 โดยค่าคงที่ของฟาราเดย์ (F) = 96,500 โวลต์ต่อหนึ่งอิเล็กตรอน ดังนั้น ค่าพลังงานอิสระของการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมกับแคโทด (ΔG_{Al}) = -0.98 เมกะจูลต่อโมล ค่าพลังงานอิสระของการกัดกร่อนของแมกนีเซียมกับแคโทด (ΔG_{Mg}) = -1.25 เมกะจูลต่อโมล เมื่อ $\Delta G_{Mg} > \Delta G_{Al}$ ดังนั้น แมกนีเซียมมีแนวโน้มจะถูกกัดกร่อนและหลุดออกจากโครงสร้างพื้นอะลูมิเนียมในรูป Mg^{2+} และไปรวมกับ OH^- แล้วฟอร์มตัวเป็น $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ส่วนธาตุซิลิกอนยังคงอยู่กับโครงสร้างพื้นอะลูมิเนียม ดังนั้นการกัดกร่อนแบบเฉพาะสามารถเกิดได้ที่เฟส Mg_2Si

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกรณีศึกษาของอุณหพลศาสตร์และพฤติกรรมการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของอะลูมิเนียมรีดที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเกรด 6061 โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- อะลูมิเนียมสามารถสร้างฟิล์มชั้นบางของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ จะฟอร์มตัวบนผิวหน้าโลหะอะลูมิเนียมในช่วง pH 5.7-8.5 โดยช่วง pH ที่ต่ำกว่า 5 โลหะอะลูมิเนียมจะถูกกัดกร่อนแล้วเกิด Al^{3+} ส่วนในช่วงที่ pH ที่มากกว่า 8.5 โลหะอะลูมิเนียมจะถูกกัดกร่อนแล้วเกิด AlO_2^-
- พฤติกรรมการกัดกร่อนของอะลูมิเนียม 6061- T6 ในสารละลายจำลองบรรยากาศชายฝั่งนั้นแสดงช่วงพาสซีฟเมื่อศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นฟิล์มพาสซีฟเกิดความเสียหายและเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ณ ศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่แบบรูเข็ม (E_{pit})
- ผลจากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์พบบ เส้นโค้งโนควิสต์นั้นประกอบไปด้วยเส้นโค้งการเก็บประจุของเส้นโค้งที่ 1 นั้นเกี่ยวข้องกับฟิล์มชั้นบางและเส้นโค้งที่ 2 หมายถึงพื้นผิวของอะลูมิเนียม 6061 และเมื่อฟิล์มชั้นบางนั้นถูกทำลาย อัตราการกัดกร่อนของพื้นผิวจะสูงขึ้น

- การกัดกร่อนแบบเฉพาะที่แบบรูเข็มของอะลูมิเนียม 6061- T6 ในบรรยากาศชายฝั่งนั้นสามารถเกิดได้จากการกัดกร่อนของอนุภาค Mg_2Si โดยการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่สามารถเริ่มที่การกัดกร่อนของแมกนีเซียมจากโครงสร้างพื้นอะลูมิเนียม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรีในการสนับสนุนทุนวิจัยและขอขอบคุณคณะพาณิชย์นาวินานาชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาสำหรับสถานที่ในการทำวิจัย

References

- [1] Aruri, D., et al (2013). Wear and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy surface hybrid composites [(SiC + Gr) and (SiC + Al_2O_3)] fabricated by friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(4), 362-369.
- [2] Phiphatthakul, M., et al (2023). A Study of Heat Transfer Characteristics of Double Pipe Heat Exchanger with Twisted Tape Inserts. *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 3(6), 1-10. (in Thai)
- [3] Chowwanonthapunya, T., et al (2018). Predictive approach for corrosion study of low alloy steel in a simulated coastal atmosphere. *Journal of Science and Technology Maharakham University*, 37(1), 108-112. (in Thai)
- [4] Peeratatsuwan, C., et al. (2022). A Thermodynamic Investigation on Corrosion of Cu-bearing Steel in Aqueous Solutions. *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 12(33), 16-26.
- [5] Sekularac, G., et al. (2018). Corrosion of aluminum alloy $AlSi_7Mg_{0.3}$ in artificial sea water with added sodium sulphide. *Corrosion Science*, 144, 54-73.
- [6] Yang, X. K., et al. (2017). Properties degradation and atmospheric corrosion mechanism of 6061 aluminum alloy in industrial and marine atmosphere environments. *Materials and Corrosion*, 68(5), 529-535.
- [7] Luo, D., et al. (2022). Corrosion resistance of 6061-T6 aluminum alloy and its feasibility of near-surface reinforcements in concrete structure. *Reviews on Advanced Materials Science*, 61, 638-653.
- [8] Liang, M., et al. (2018). Corrosion and pitting of 6060 series aluminum after 2 years exposure in seawater splash, tidal and immersion zones. *Corrosion Science*, 140, 286-296.
- [9] Chowwanonthapunya, T., et al (2015). Review of Corrosion of Carbon Steel in CO_2 – Containing Environment of the Oil and Gas Industry: Mechanism Understanding to Prediction Model. *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 5(14), 31-41. (in Thai)
- [10] Pourbaix, M. (1990). Thermodynamics and Corrosion. *Corrosion Science*, 30(10), 963-988.
- [11] Chowwanonthapunya, T. (2022). *Fundamentals of Corrosion Engineering*. Chiangmai:

Research Article

Journal of Advanced Development in Engineering and Science

Vol. 14 • No. 40 • May – August 2024

Chiang Mai University Press. (in Thai)

- [12] McCafferty, E. (2010). Introduction to Corrosion science. New York: Springer.
- [13] Pourbaix, M.(1973). *Lectures on Electrochemical Corrosion*. New York: Plenum Press.
- [14] Can, P., et al. (2022). The corrosion behavior of the 6061 Al alloy in simulated Nansha marine atmosphere. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 709-721.